



Statens vegvesen

Fullskala brannforsøk 100 MW brannsikret PE-skum

RAPPORT

Teknologiavdelingen

Nr. 2488



Geo- og tunnelseksjonen
Dato: 2007-05-21



Statens vegvesen

Vegdirektoratet
Teknologiavdelingen

Postadr.: Postboks 8142 Dep
0033 Oslo

Telefon: (+47 915) 02030

www.vegvesen.no

TEKNOLOGIRAPPORT nr. 2488

Tittel

Fullskala brannforsøk 100 MW brannsikret PE-skum

Utarbeidet av

Harald Buvik

Dato:

2007-05-21

Saksbehandler

Harald Buvik

Prosjektnr:

601350

Kontrollert av

Mona Lindstrøm

Antall sider og vedlegg:

22 + 3 vedlegg

Sammendrag

6. september 2006 ble det gjennomført fullskala brannforsøk på et 22 m langt felt som var oppsatt med nymonterte PE-skumplater beskyttet med 80 mm tykt nettarmert sprøytebetonglag tilsatt 2 kg PP-fiber pr.m³. Dette tilsvarer de kravene som i dag stilles til både materialer og montering av tilsvarende typegodkjent løsning. Brannbeskyttelsen ble påført 5. april 2006.

Den oppsatte tunnelkledningen ble branntestet i virkelig utførelse for en dieselbrann med rask brannutvikling opp til 100 MW, deretter varierende mellom 80 - 100 MW i en time for deretter å falle gradvis tilbake til rundt 10 MW etter 3,5 timer. Denne branneffekten holdt seg konstant i ytterligere 2 timer. Vekstraten for temperatur i 60 minutter (både for stigning og maksimalverdi) i denne testen kan sammenlignes med de høyeste brannkurvene for tid-temperatur.

Prøvekonstruksjonen var intakt under hele forsøket og kun mindre smelteskader i isolasjonen (PE-platene) ble observert under etterkontroll. Det var ikke antydning til antennelse av isolasjonen bak sprøytebetonghvelvet. Mange småsprekker i sprøytebetongoverflaten og litt avskalling i et begrenset område ble observert. Sprøytebetonghvelvet hadde varierende tykkelse (fra 80 mm til 150 mm), noe som er over det som er gjeldende krav. Etterberegninger har vist at 80 mm sprøytebetongtykkelse er minimum for tilstrekkelig å kunne beskytte underliggende brennbar isolasjon i henhold til akseptkravet.

Summary

Emneord:

Tunnel, vann- og frostsikring, sprøytebetong, PE-skum, brann

1	INNLEDNING.....	2
2	TESTMETODE - GJENNOMFØRING	3
2.1	MÅLEOPPLEGG	4
2.2	PLASSERING AV MÅLEINSTRUMENTER.....	6
3	RESULTATER.....	10
3.1	MÅLING OG BEREKNING AV STØRRELSEN PÅ BRANNEN	10
3.2	MÅLENØYAKTIGHET	13
3.3	VISUELLE OBSERVASJONER ETTER BRANNEN	14
3.4	SKADER PÅ BERGKONSTRUKSJONEN SOM FØLGE AV BRANNEN	17
3.5	VURDERING AV SPRØYTEBETONGHVELVET OPP MOT AKSEPTKRITERIET	19
4	KONKLUSJON.....	22
5	VEDLEGG.....	23

1 Innledning

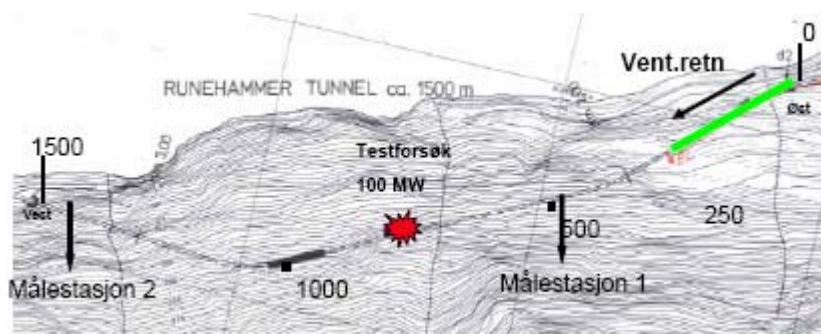
Runehamar testtunnel ved Åndalsnes i Møre og Romsdal ble etablert for å kunne gjennomføre fullskala brannforsøk under mest mulig realistiske omgivelser. Denne testtunnelen som er 1500 m lang kan også benyttes til øvrige tunnelteknologiske forskningsoppgaver alt etter behov og ønsker.

For Statens vegvesens egen del er en slik forskningstunnel både naturlig og nyttig i det arbeidet som nå er i gang gjennom FoU-prosjektet "Tunnelutvikling". I et slikt utviklingsprosjekt vil nettopp branntesting av både nye materialer og konseptløsninger være sentrale arbeidsområder. Kvalitetssikringen i utviklingsarbeidet vil kunne skje ved dokumentasjonskrav oppnådd gjennom fullskalaforsøk.

6. september 2006 ble det gjennomført fullskala brannforsøk på et 22 m langt felt som var oppsatt med nymonterte PE-skumplater beskyttet med 80 mm tykt nettarmert sprøytebetonglag tilsatt 2 kg PP-fiber pr.m³. Dette tilsvarer de kravene som i dag stilles til både materialer og montering av tilsvarende typegodkjent løsning. Brannbeskyttelsen ble påført 5. april 2006.

2 Testmetode - gjennomføring

Prøvefeltet er montert fra 788 – 810 m inne i Runehamartunnelen (fra innløp øst). Feltet har en utstrekning på 22 m. Prøveobjektet er tunnelkledning bestående av 50 mm PE-skumplater brannbeskyttet med 80 mm nettarmert sprøytebetong tilsatt 2 kg PP (polypropylen) fiber pr.m³.



Figur 1 Oversikt over testfeltet i tunnelen

Sentrisk i lengderetningen av testfeltet ble det bygd et 40 m² (4,8 x 8,3 m) kar. Det ble lagt to lag plast i bunnen, deretter ble det stablet opp to høyder med lecablokker som fungerte som vegger. Det ble så lagt på et siste lag med plast for å forhindre at vann og diesel skulle trenge inn i lecablokkene. Sette ble til slutt stabilisert ved hjelp av sand som ble plassert rundt hele karet. Før testen ble det fylt ca. 5 cm vann i bunnen av karet, deretter ble karet fylt med 11 000 l diesel.

Ventilasjon i tunnelen ble igangsatt ved to fastmonterte vifter i inngangspartiet i tunnelen (fig. 2). I tillegg var det montert en ekstra mobil vifte. Teoretisk viftekapasitet 2,5 – 3,0 m/s.



Figur 2 Fastmonterte og mobil vifte

Dieseloljen ble antent ved å helle ca. 4 liter bensin i karet som så ble antent med en fakkel. Brannutviklingen ble observert ved videooptak helt til tunnelrommet ble fylt med svart røyk.

I forsøket er varmeavgivelsen beregnet ut fra målinger ved en målestasjon nedstrøms teststedet ved hjelp av den såkalte: "Oxygen Depletion Method". Her beregnes den mengden oksygen som blir forbrukt av brannen basert på måling av gasskonsentrasjoner, hastigheter, luftfuktighet og temperaturer. Varmeavgivelsen beregnes deretter på grunnlag av brennverdien til oksygen. Alle beregninger er utført av Sintef NBL som også var ansvarlig for gjennomføringen av testen.

Brannen var beregnet å ha en varighet på 90 – 120 minutter. På grunn av for liten ventilasjonskapasitet ble brannens utviklede mottrykk større og det resulterte i sterkt redusert ventilering under forsøket. Dette igjen medførte en utvidet varighet på brannen til totalt 210 – 240 minutter. Av denne totaltiden utgjorde hovedbrannen ca. 120 minutter og flere brannutviklinger fulgte deretter med varierende intensitet. På den annen side medførte dette at konstruksjonen fikk en lengere branneksposering enn forutsatt.

2.1 Måleopplegg

Materialeseksjonen i Teknologivdelingen v/ Claus K. Larsen utarbeidet forslag til et måle- og prøvningsprogram for branntesten. Forslaget er basert på erfaringer fra forrige branntest (mai 2006) og behovet for dokumentasjon fra slike fullskala branntester.

Registreringer før brannforsøket

Feltet med sprøytebetong inspiseres for riss, sprekker, avskallinger eller andre skader. Det tas ut 4 stk prismer for fuktbestemmelse (2 stk i hver ende av feltet). Sprøytede kasser tas med ut av tunnelen før brannen. Utboring av kjerner fra kassene for dokumentasjon av fasthet, densitet og porøsitet, samt fuktinnhold.

Registreringer under brannforsøket

Temperaturen i tunnelen logges slik at brannbelastningen i form av tid-temperatur kurver kan dokumenteres for *hele* feltet. Det monteres termotråder bak sprøytebetongen slik at dens evne til å beskytte PE-skummet kan dokumenteres i *hele* feltet. Videre monteres det termotråder i luftrommet mellom PE-skummet og berget, slik at temperaturen bak PE-skummet kan dokumenteres i *hele* feltet. Det siste for å dokumentere en eventuell nedsmelting eller antenning av PE-skum.

Temperaturen i hengen logges for hver 50 m både i opp- og nedstrøms retning frem til 200 m fra brannen. Dette for å dokumentere brannbelastningen på tilstøtende tunnelkledning eller tenkt ubeskyttet PE-skum.

Det foretas målinger i nødvendig omfang for å dokumentere brannbelastningen i form av HRR og total varmeavgivelse. I tillegg foretas det nødvendige målinger for å dokumentere eventuelle farlige avgasser fra en mulig forbrenning av PE-skum. Ventilasjonshastigheten logges i ulike snitt.

Alle målinger startes minst 30 minutter før antenning, og det foretas en kvalitetssikring av alle målepunkt. Loggingen av alle målepunkt foretas minst 1 time etter at brannen har slukket. Brannforsøket filmes og fotodokumenteres.

Registreringer etter brannforsøket

Feltet med sprøytebetong inspiseres for riss, sprekker, avskallinger eller andre skader. Det tas ut 4 stk prismer for fuktbestemmelse (2 stk i hver ende av feltet). Utboring av kjerner eller annen prøvetaking for dokumentasjon av fasthet, densitet og porøsitet.

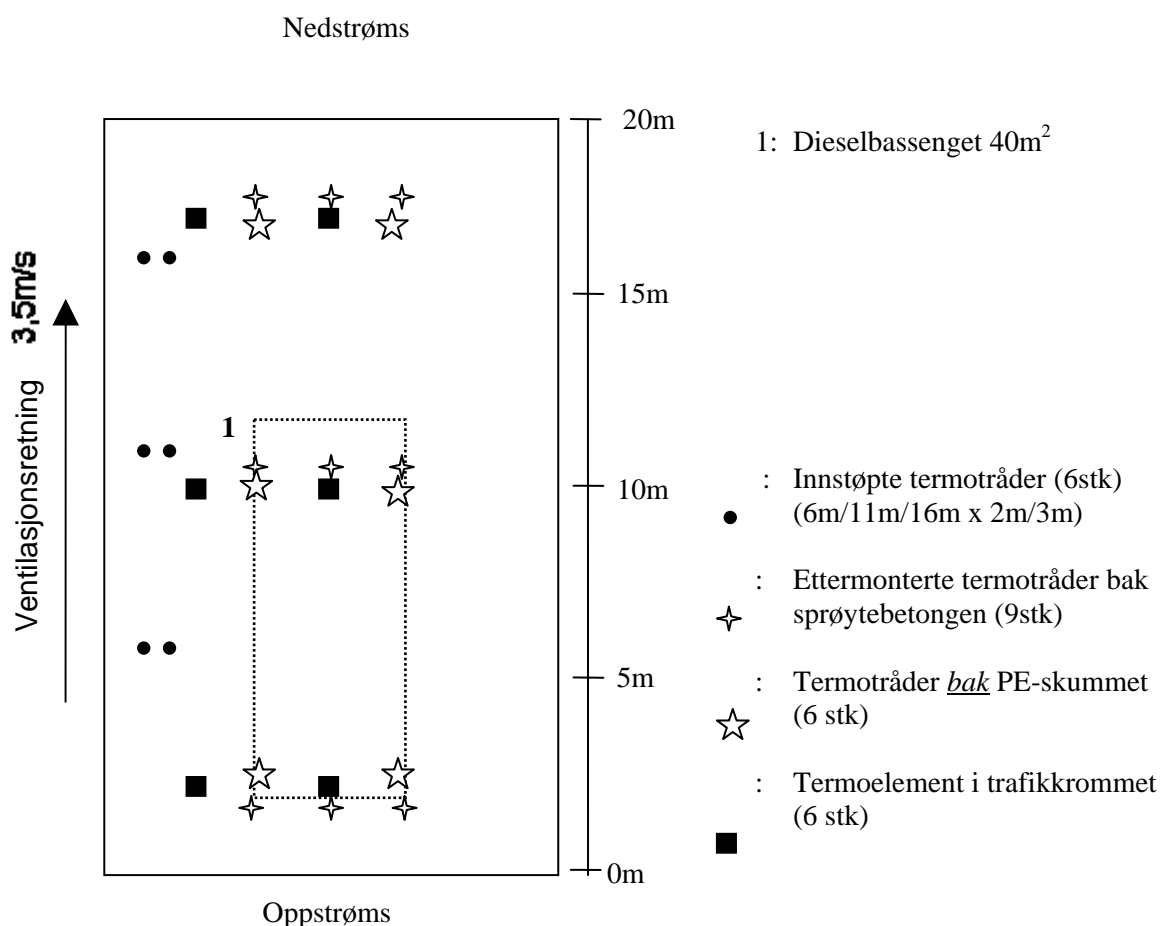
Sprøytebetongen pigges ned for å inspisere PE-skummet på baksiden. Prøvetaking samt fotodokumentasjon.

Omfang og plassering av temperaturmålingene i prøvefeltet

Under er gitt et par skisser som viser omfang og plassering av alle målepunktene for temperatur i prøvefeltet. Det er gjort en vurdering av omfang og plassering ut fra prinsippet om at "jo flere målinger, jo bedre dokumentasjon". Dette gjelder både for å sikre at vi får dokumentert det vi skal selv om enkelte målepunkt faller ut underveis (dobbeltmålinger, KS) og for å kunne gjøre en grundigere vurdering av brannforsøket i ettertid. Videre kan målingene være med på å danne grunnlag for modellering av slike brannforsøk (brannbelastning i form av temperaturpåkjenning i feltet, samt tilhørende respons). Det kan derfor synes som om det er (unødvendig) mange målepunkt, men disse har alle meget stor verdi for vurderingen og dokumentasjonen av brannforsøket. Husk at vi i svært liten grad har dokumentasjon av slike fullskala branner.

Det er allerede innstøpt 6 stk termotråder (ble gjort rett før sprøyting), men disse er plassert i et område som antas å ikke få maksimal temperaturpåkjenning. Disse benyttes til verifiserende målinger (på lokalitet, men hovedsakelig på måleteknikk eller "monteringsteknikk").

Det er også gitt et forslag til et opplegg som er et minimum av målinger i prøvefeltet.



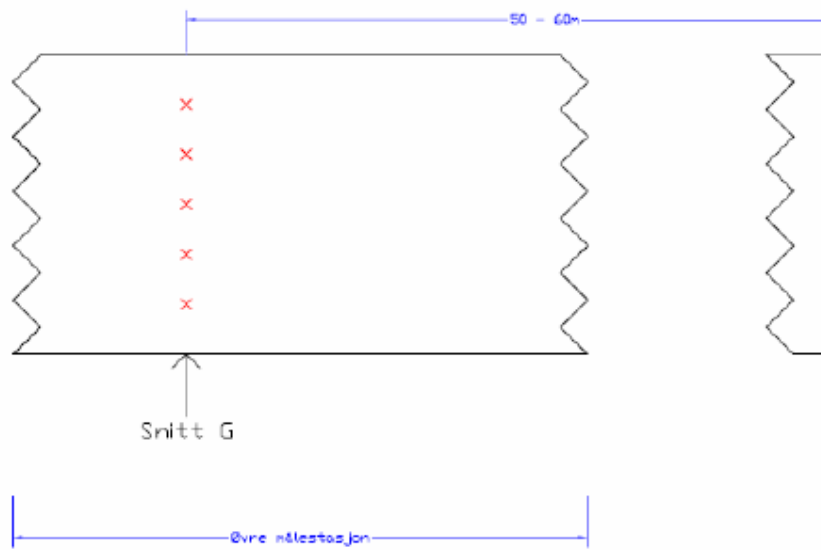
Figur 3 Skisse over målepunkter for temperatur i tunnelen

2.2 Plassering av måleinstrumenter

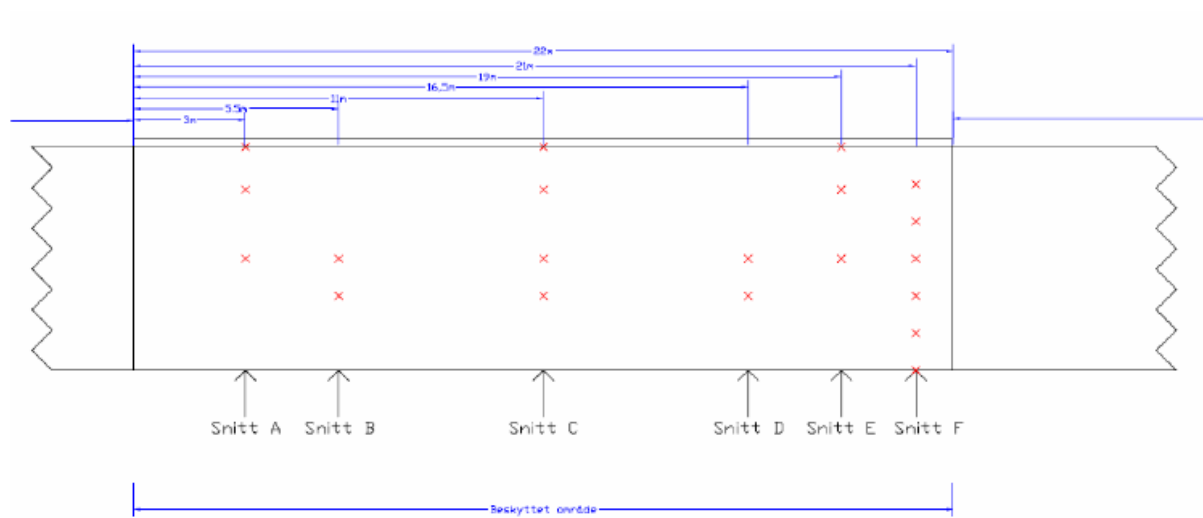
Instrument list for 107398-Runhamar

	Nr	IMP	Ch.	Instr.	Description
Venstre side av beskyttet område	41	43	1	TcG 1	Temperatur Gass 2m over bakken, venstre side. Snitt A
	42	43	2	TcBB 1	Temperatur bak Betong 4m over bakken, venstre side. Snitt A
	43	43	3	TcG 2	Temperatur Gass 4m over bakken, venstre side. Snitt A
	44	43	4	TcBB 2	Temperatur bak Betong 5m over bakken, venstre side. Snitt A
	45	43	5	TcBPE 1	Temperatur bak PE-skum 5m over bakken, venstre side. Snitt A
	46	43	6	TcBB 6	Temperatur bak Betong 2m over bakken, venstre side. Snitt C
	47	43	7	TcG 6	Temperatur Gass 2m over bakken, venstre side. Snitt C
	48	43	8	TcBB 7	Temperatur bak Betong 3m over bakken, venstre side. Snitt C
	49	43	9	TcG 7	Temperatur Gass 4m over bakken, venstre side. Snitt C
	50	43	10	TcBB 8	Temperatur bak Betong 5m over bakken, venstre side. Snitt C
	51	43	11	TcBPE 3	Temperatur bak PE-skum 5m over bakken, venstre side. Snitt C
	52	43	12	TcG 11	Temperatur Gass 2m over bakken, venstre side. Snitt E
	53	43	13	TcBB 12	Temperatur bak Betong 4m over bakken, venstre side. Snitt E
	54	43	14	TcG 12	Temperatur Gass 4m over bakken, venstre side. Snitt E
	55	43	15	TcBB 13	Temperatur bak Betong 5m over bakken, venstre side. Snitt E
	56	43	16	TcBPE 5	Temperatur bak PE-skum 5m over bakken, venstre side. Snitt E
	57	43	17	TcG 13	Temperatur Gass 6m over bakken, venstre side. Snitt E
	58	43	18	TcBB 14	Temperatur bak Betong 6m over bakken, venstre side. Snitt E
	59	43	19	TcG 16	Temperatur Gass, senter 5m over bakken, senter. Snitt F
	60	43	20	TcG 17	Temperatur Gass, senter 4m over bakken, senter. Snitt F
Høyre side av beskyttet område	61	44	1	TcG 3	Temperatur Gass 6m over bakken, høyre side. Snitt A
	62	44	2	TcBB 3	Temperatur bak Betong 6m over bakken, høyre side. Snitt A
	63	44	3	TcPE 2	Temperatur bak PE-skum 5m over bakken, høyre side. Snitt A
	64	44	4	TcBB 4	Temperatur bak Betong 5m over bakken, høyre side. Snitt A
	65	44	5	TcG 4	Temperatur Gass 4m over bakken, høyre side. Snitt A
	66	44	6	TcBB 5	Temperatur bak Betong 4m over bakken, høyre side. Snitt A
	67	44	7	TcG 5	Temperatur Gass 2m over bakken, høyre side. Snitt A
	68	44	8	TcG 8	Temperatur Gass 6m over bakken, høyre side. Snitt C
	69	44	9	TcG 15	Temperatur Gass 2m over bakken, høyre side. Snitt E
	70	44	10	TcBB 16	Temperatur bak Betong 4m over bakken, høyre side. Snitt E
	71	44	11	TcG 14	Temperatur Gass 4m over bakken, høyre side. Snitt E
	72	44	12	TcBB 15	Temperatur bak Betong 5m over bakken, høyre side. Snitt E
	73	44	13	TcBPE 6	Temperatur bak PE-skum 5m over bakken, høyre side. Snitt E, (Hulrom)
	74	44	14	TcBPE 7	Temperatur bak PE-skum 5,6m over bakken, høyre side. Snitt E, (Hulrom)
	75	44	15	TcG 10	Temperatur Gass 2m over bakken, høyre side. Snitt C
	76	44	16	TcBB 11	Temperatur bak Betong 4m over bakken, høyre side. Snitt C
	77	44	17	TcG 9	Temperatur Gass 4m over bakken, høyre side. Snitt C
	78	44	18	TcBB 10	Temperatur bak Betong 5m over bakken, høyre side. Snitt C
	79	44	19	TcPE 4	Temperatur bak PE-skum 5m over bakken, høyre side. Snitt C
	80	44	20	TcBB 9	Temperatur bak Betong 6m over bakken, høyre side. Snitt C
DataQ IP: 192.168.0.83					
81	1		TcBBS 1	Temperatur bak sprøytebetong 2m overbakken, høyre side, Snitt B	
82	2		TcBBS 2	Temperatur bak sprøytebetong 3m overbakken, høyre side, Snitt B	
83	3		TcBBS 3	Temperatur bak sprøytebetong 2m overbakken, høyre side, Snitt C	
84	4		TcBBS 4	Temperatur bak sprøytebetong 3m overbakken, høyre side, Snitt C	
85	5		TcBBS 5	Temperatur bak sprøytebetong 2m overbakken, høyre side, Snitt D	
86	6		TcBBS 6	Temperatur bak sprøytebetong 3m overbakken, høyre side, Snitt D	
87	7		TcG 18	Temperatur Gass, senter 3m over bakken, senter. Snitt F	
88	8		TcG 19	Temperatur Gass, senter 2m over bakken, senter. Snitt F	
89	9		TcG 20	Temperatur Gass, senter 1m over bakken, senter. Snitt F	
90	10		TcG 21	Temperatur Gass, senter 0m over bakken, senter. Snitt F	
DataQ IP: 192.168.0.84					
91	1		TcG -70m,1m	Temperatur Gass 1m over bakken, senter. Snitt G (-70m)	
92	2		TcG -70m,2m	Temperatur Gass 2m over bakken, senter. Snitt G (-70m)	
93	3		TcG -70m,3m	Temperatur Gass 3m over bakken, senter. Snitt G (-70m)	
94	4		TcG -70m,4m	Temperatur Gass 4m over bakken, senter. Snitt G (-70m)	
95	5		TcG -70m,5m	Temperatur Gass 5m over bakken, senter. Snitt G (-70m)	
96	6			Trykkmåling, differanse 1m over bakken, senter. Snitt G (-70m)	
97	7			Trykkmåling, differanse 3m over bakken, senter. Snitt G (-70m)	
98	8			Trykkmåling, differanse 5m over bakken, senter. Snitt G (-70m)	
99	9			Trykkmåling, abselutt 1m over bakken, venstre. Snitt G (-70m)	
100	10			Oksygenmåling, 5m over bakken, Snitt G (-70m)	

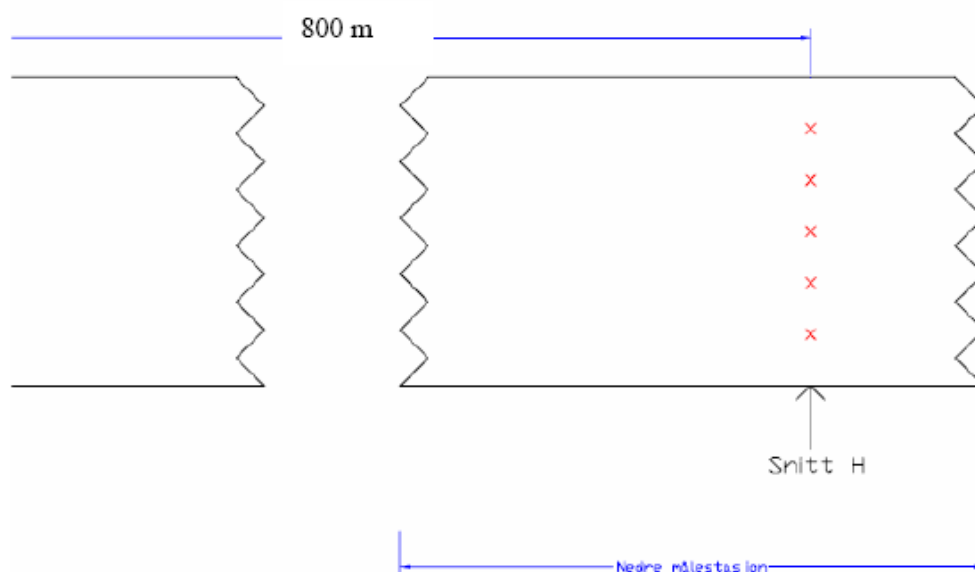
Figur 4 Instrumentliste for termoelementer i prøvingsfeltet



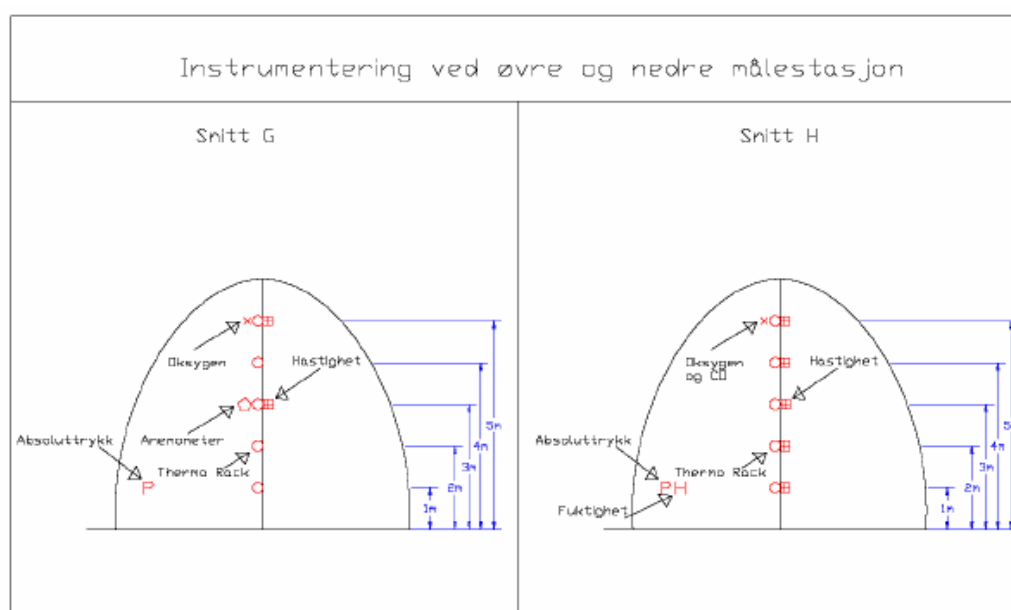
Figur 5 Avstand fra framkant av dieselpøl til målestasjon 1 (snitt G) ca. 70 m



Figur 6 Viser horisontal plassering av de ulike målesnittene i selve prøvelfeltet. (Snitt A er ved framkant av pølen)



Figur 7 Viser avstand til nedre målestasjon ca 800 m nedstrøms pølen (snitt H). Her ble målinger av varmeavgivelse og giftighet utført.



Figur 8 Viser plassering av måleinstrumentene sentrert i tunneltverrsnittet for å måle temperatur, hastighet, trykk og oksygenkonsentrasjon i snitt G og H.

3 Resultater

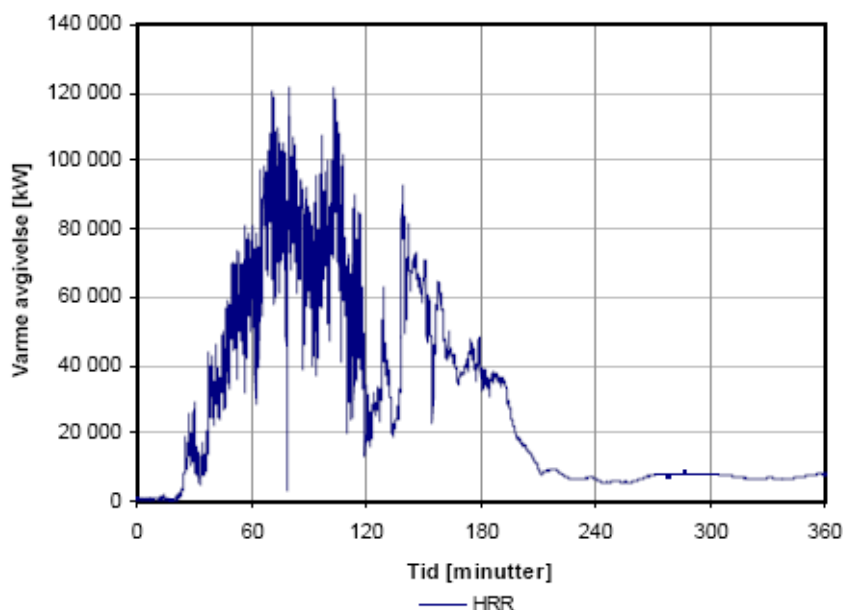
3.1 Måling og beregning av størrelsen på brannen

På bakgrunn av det måleopplegget som var gjennomført anses målingene av brannstørrelsen som rimelig nøyaktig. Målingene som varmeavgivelse er basert på er forsinket i tid. Fra de oppsto i brannen og til de ble målt ved målestasjon 2 ca. 800 m nedstrøms har de endret karakter. Konsekvenser av denne endringen er redegjort for i kap. 3.2 Målenøyaktighet, se nedenfor.



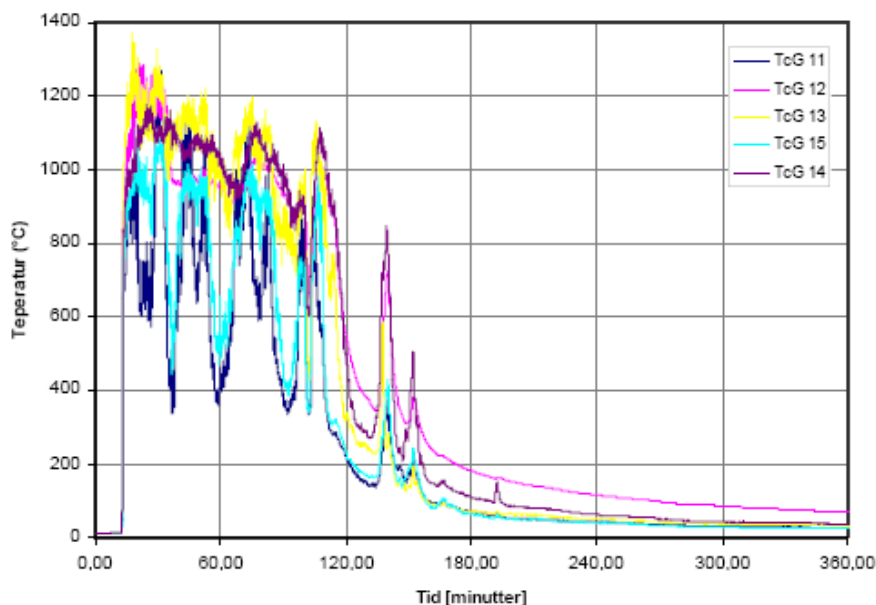
Figur 10 Logging av resultater

Brannens varmeeffekt var i overkant av 100 MW for deretter gradvis å falle tilbake. Brannen utviklet seg lineært opp til 100 MW over en time. Gasstemperaturmålingene viser temperaturstigning til 1200 °C i løpet av ett minutt. Det er grunn til å anta at varmeavgivelsen var vesentlig raskere enn presentert i beregningene av HRR og at den følger mer temperaturutviklingen, jfr. målenøyaktighet og tidsforsinkelse.

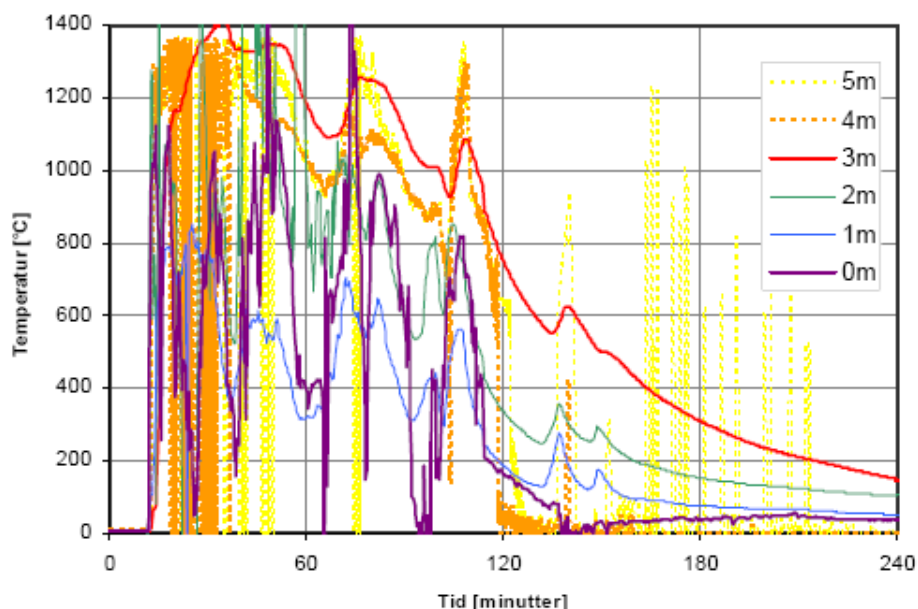


Figur 11 Brannstørrelse beregnet basert på målinger 800 m nedstrøms pølen.

Det er observert gasstemperaturer på over 1400 °C og ved betongoverflaten er det registrert vel 1100 °C sammenhengende i to timer. Økningen i temperaturen som er observert overgår både HC-kurven og RWS-kurven, både med hensyn til stigningsrate og maksimalverdi. I snitt C er det observert temperaturer over 1200 °C ned til 2 m over vegbanen. Høyest eksponering er registrert i snitt E og F. I snitt E ligger høyeste temperaturbelastning fra 4 m (venstre side) opp til hengen i midten.



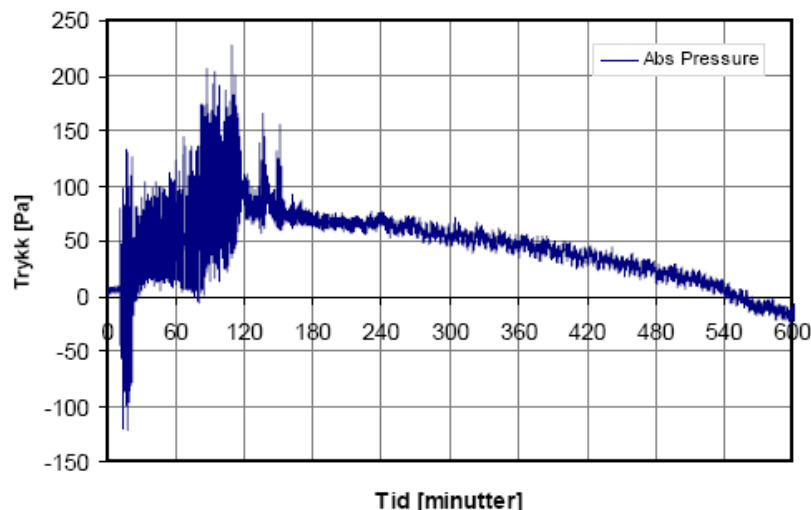
Figur 12 Gasstemperatur 5 – 10 cm ut fra sprøytebetonghvelvet i snitt E



Figur 13 Gasstemperaturer plassert sentrert i snitt F.

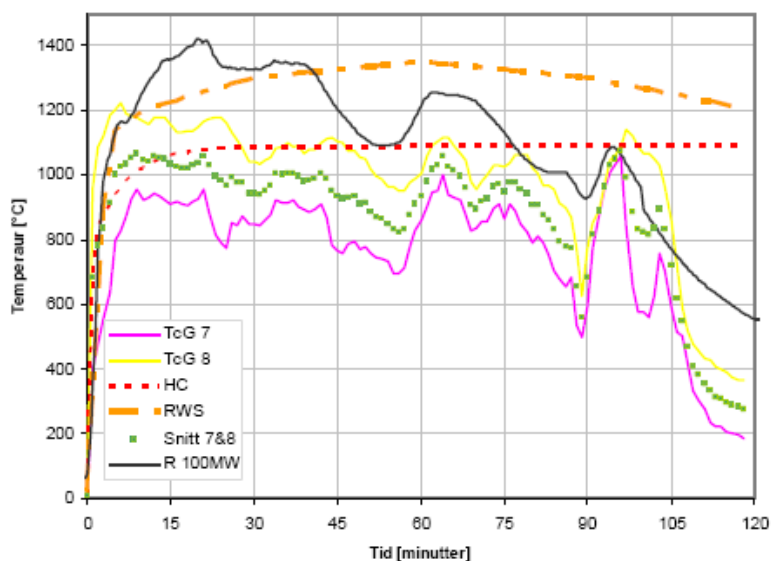
Oppnådd ventilasjonshastighet var gjennomgående vel 1 – 1,5 m/s i tunnelen før antennelse. Etter antennelse falt hastigheten oppstrøms ned mot null (< 0,5 m/s) etter 40 minutter og nedstrøms brannen falt strømningshastigheten til 0,5 – 1,0 m/s umiddelbart etter antennelse.

I den første fasen av brannen ble det observert betydelige trykkvariasjoner og svingninger i strømningshastigheten. Frekvensen på svingningsvariasjonene er estimert til om lag 0,5 Hz (1 svinging pr 2 sekunder). Etter 120 minutter er målefrekvensen redusert fra 10 Hz til 0,05 Hz. Det statiske overtrykket i tunnelen i forhold til ute varierte under hele den mest intense fasen av brannen med om lag +/- 100 Pa med en frekvens på om lag 0,5 Hz. Maksimaltrykket kom opp mot 200 Pa og trykket stabiliserte seg med et betydelig overtrykk som vedvarte til tunnelen ble nedkjølt.



Figur 14 Overtrykk i tunnelen (målt 70 m oppstrøms)

Ved å sammenligne måleresultatene med standard tid – temperaturkurver har denne brannen høyere temperatur enn det som tidligere er målt.



Figur 15 Tid-temperaturkurve målt i forsøket sammenlignet med kjente standard tid-temperaturkurver, slik som RWS-kurven (Rijkswaaterstaat) og HC-kurven (Hydrocarbon fire curve).

Varigheten av hovedbrannen har vært ca. 105 minutter, med flere mindre branner som har blusset opp etter 130 minutter og 150 minutter. I den første timen kan brannen sammenlignes med RWS-kurven for så å følge HC-kurven 30 minutter. Deretter faller temperaturen.

Varmeeksponering til hvelvet er i denne brannen betydelig kraftigere enn HC-kurven i den første timen, dette grunnet det faktum at varmekraft følger temperaturen i fjerde potens. I tillegg har varigheten vært betydelig lengre og anses til 2 timer når man tar hensyn til mindre oppblussing av flammene ved 130 minutter og 150 minutter.

Brannen har også satt opp et betydelig mottrykk til ventilasjonen og forårsaket sterkt redusert ventilering under forsøket grunnet for liten ventilasjonskapasitet.

Prøvekonstruksjonen var intakt under hele forsøket og kun mindre smelteskader i isolasjonen (PE-platene) ble observert under etterkontroll. Det var ikke antydning til antennelse av isolasjonen bak sprøytebetonghvelvet. Mange småsprekker i sprøytebetongoverflaten og litt avskalling i et begrenset område ble observert. Sprøytebetonghvelvet hadde varierende tykkelse (fra 80 mm til 150 mm), noe som er over det som er gjeldende krav. Etterberegninger har vist at 80 mm er minimum for tilstrekkelig å kunne beskytte underliggende brennbar isolasjon i henhold til akseptkravet.

3.2 Målenøyaktighet

Måling av temperaturer er direkte målinger basert på kapsla 1,5 mm termoelement av type K. Nøyaktigheten i selve termoelementet er bedre enn $\pm 1\%$, men ved høy temperatur i og omkring flammer utsettes termoelementene utenfor den varme sonen for termisk stråling. Slik stråling kan gi betydelig avvik idet termoelementtemperaturen ikke da nødvendigvis representerer gasstemperaturen. Ved total omhylling av flammer og mye sot vil denne feilkilden bli vesentlig mindre. Slike gasstemperaturer er ikke rapportert i denne testen.

Måling av hastigheter er basert på trykkdifferanse over bidireksjonale prober. Nøyaktigheten er innenfor $\pm 5\%$ for hastigheter mellom 1 m/s og 20 m/s. Alle trykkmålinger er direkte og det benyttes trykktransmittere tilpasset de ulike måleområdene. Trykktransmittere er nøyaktige og normalt bedre enn $\pm 2\%$. Nøyaktigheten ved store transienter i trykket er usikre.

Måling av oksygenkonsentrasjoner er basert på "Servomex 575 Oxygen analyser". Gassen blir renses, tørket og trykknøytralisert før den føres inn i selve analysatoren. Denne type målere er avhengig av jevnlig kontroll med kjent referansegass. Slik kontroll ble gjennomført like før test og nøyaktigheten på differansekonsentrasjonen i forhold til atmosfæren har en nøyaktighet innenfor $\pm 5\%$ i forhold til måleområdet.

Måling av relativ fuktighet baserer seg på direktemåling av oppvarmet gass (150 °C) for så å beregne konsentrasjonen i det aktuelle målepunktet korrelert i forhold til temperaturen.

Målingene av massestrøm og gasskonsentrasjoner er basert på relativt få målepunkt. Antagelser om hastighetsprofil er basert på erfaringer fra forsøk utført i andre tunneler. På bakgrunn av korrelasjoner til temperaturprofilen er massestrømmen i tunnelen beregnet. Den utregnede massestrømmen vil generelt for slike målinger ha et avvik på $\pm 10\text{--}20\%$ og beregnede varmeavgivelse noe høyere avvik $\pm 20\text{--}30\%$. Nøyaktigheten avhenger også av at man kjenner totalmengden brensel som har inngått i forsøket.

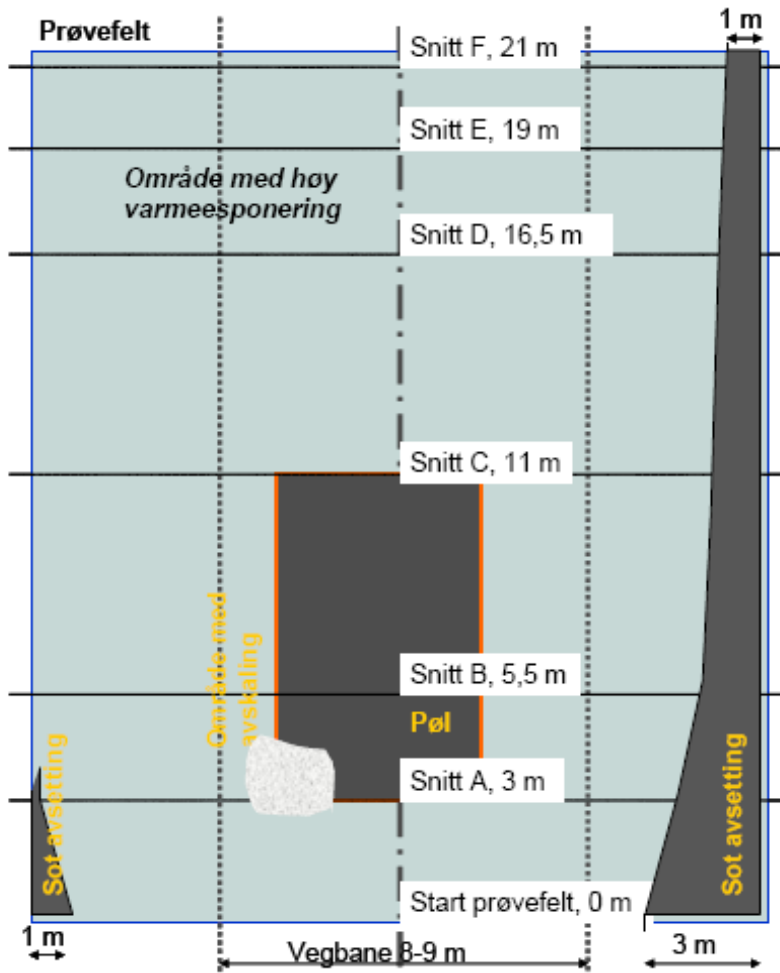
Beregning av varmeavgivelse er direkte proposjonalt med massestrømmen og redusert oksygenkonsentrasjon. I brannforsøk er det vanlig å måle de nødvendige størrelsene for å beregne varmeavgivelsen nedstrøms der temperaturen er lav nok til at instrumentene beskyttes. Den reduserte oksygenkonsentrasjonen som oppstår i selve flammene blir ikke registrert i måleinstrumentene før den

er transportert ned til målestasjonen. Endring i massetransporten vil normalt bli observert tidlig i og med at trykkendringene går med lydens hastighet, mens endring i oksygenkonsentrasjonen må transporteres ned til målestasjonen. Det er derfor to ulike mekanismer som transporterer tilstanden i brannen ned til målestasjonen og dette gir en faseforskyvning som det er vanskelig å rette opp. Noe blir rettet opp med å kompensere for antatt transporttid ned til målestasjonen (oksygen) samt midling av hastighetsmålingene. Formen på varmeavgivelseskurven vil ikke kunne representere direkte det som foregår i brannen, men den vil kunne gi riktig bilde av størrelsen og varigheten av brannen.

3.3 Visuelle observasjoner etter brannen

Visuelle observasjoner av prøvekonstruksjonen er gjort i forbindelse med opprenskingsarbeidet i tunnelen. Prøvetaking og testing av sprøytebetongen før og etter branntesten er utført av Materialeseksjonen ved Teknologivdelingen og presentert i egen rapport.

Sprøytebetonghvelvet har motstått brannpåkjenningen og forhindret antennelse i den brennbare isolasjonen (PE-skumplatene) på baksiden.



Figur 16 Prøvekonstruksjonen "brettet ut" i forhold til vegbane og brennpøl. Visuelle observasjoner er inntegnet



Figur 17 Prøvefeltet etter test. Liten avskalling i hengen.



Figur 18 Betydelig oppsprekking av sprøytebetongoverflaten. Sprekkene trenger 2- 3 cm inn. Sprøytebetonghvelvet i dette området var ca. 100 mm tykt.



Figur 19 Pigget hull på om lag 1 m². I nederste område ses smeltet isolasjon.



Figur 20 Pigget hull viser armering og intakt isolasjon. Hulrommet i hele prøvekonstruksjonens lengde kunne observeres uten tegn til sot eller annen forbrenning.

3.4 Skader på bergkonstruksjonen som følge av brannen

Testen resulterte i høy og langvarig varmebelastning på bergkonstruksjonen utenfor det beskyttede testområdet. Den reduserte ventilasjonskapasiteten medførte at varmebelastningen fra brannen forskjøv seg lenger oppstrøms brannstedet enn det som ville ha vært tilfelle med tilstrekkelig ventilasjon. Dette igjen resulterte i stort nedfall av bergmasser ca 100 m oppstrøms. Nedfallet var mest småfallent men med unntak av blokk på om lag 6 – 8 m³.



Figur 21 Blokknedfall oppstrøms brannstedet

Nedstrøms brannstedet medførte varmebelastningen på bergkonstruksjonen nedfall over en strekning på ca. 200 m. Dette er "normalt" nedfallsområde for brannstørrelser på 50 – 100 MW ut i fra erfaringer som vi har hatt. Nedfallet er i all hovedsak småfallent.



Figur 22 Nedfall 10 m nedstrøms



Figur 23 Nedfall 10 m nedstrøms ved vegg

Store varmpåkjenninger på ubeskyttet berg vil nødvendigvis medføre skader og nedfall. Dette er i prinsippet gammeldags ”fyrsetting” og profilet like nedstrøms brannstedet ble i løpet av denne testen utvidet med ca. 1 m. Fra 100 m – 200 m nedstrøms var nedfallet betydelig mindre og mer spredt.



Figur 2 Typisk bar bergoverflate

Samlet nedfall etter denne branntesten som varte i ca. 4 timer var ca. 700 m³ masse. Opprensning og boltesikring av området på begge sider av brannstedet medførte betydelige kostnader. For senere branntester med slike varmpåkjenninger er det all grunn til å vurdere selve teststedet mer kritisk i forhold til bergkvaliteten og deretter vurdere passiv beskyttelse av bergkonstruksjonen for evt. å redusere skadeomfanget.

3.5 Vurdering av sprøytebetonghvelvet opp mot akseptkriteriet

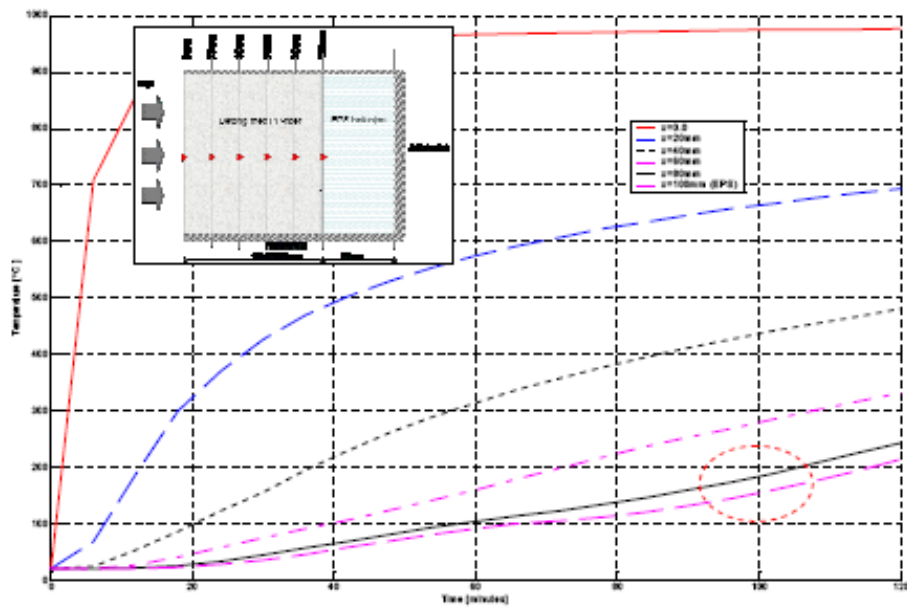
For å vurdere effekten av ulike tykkelser i sprøytebetonghvelvet som er observert (fra 80 mm til 150 mm) er resultatet supplert med beregninger gjort av Sintef NBL av termisk konduksjon i ulike tykkelser der eksponeringen er basert på målte temperaturer inntil hvelvet. Beregninger er utført for tykkelsene 60 mm, 80 mm og 100 mm med beregningsprogrammet Tempcalc. Beregningene er endimensjonale og har adiabatisk ytre grense mot fjell og beregningstiden er 2 timer.

Følgende materialdata er brukt:

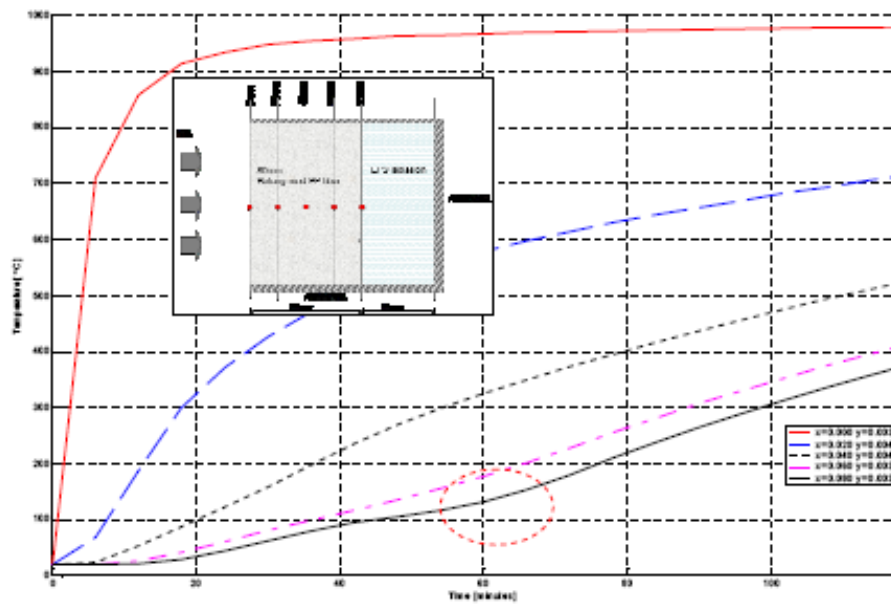
Concrete TEMPCALC 2300kg/m ³ / 3,0% CONCRETE WITH GRANITE BASE		PE - skum (ikke verifiserte data)	
Temp [°C]	Conductivity [W/m°C]	Temp [°C]	Conductivity [W/m°C]
0	1,5	0	0,03
200	0,8	100	0,03
1000	0,5	110	1
1500	0,5	120	3
		500	100
		1000	100
Temp [°C]	$\rho \times c_p$ [kJ/m ³ °C]	Temp [°C]	$\rho \times c_p$ [kJ/m ³ °C]
0	2070000	0	75000
99	2070000	100	75000
100	4554000	110	1
115	4554000	1000	1
200	2249400		
400	2392500		
1000	2254000		
1500	2198800		

Resultatet av beregningene og ved bruk av vanlige termiske data for sprøytebetong viser at 100 minutters brann samsvarer godt med estimatet på 150 °C på maksimaltemperaturen mellom sprøytebetong og isolasjon. Dette bekreftes også med de måleresultatene som ble gjort under testen.

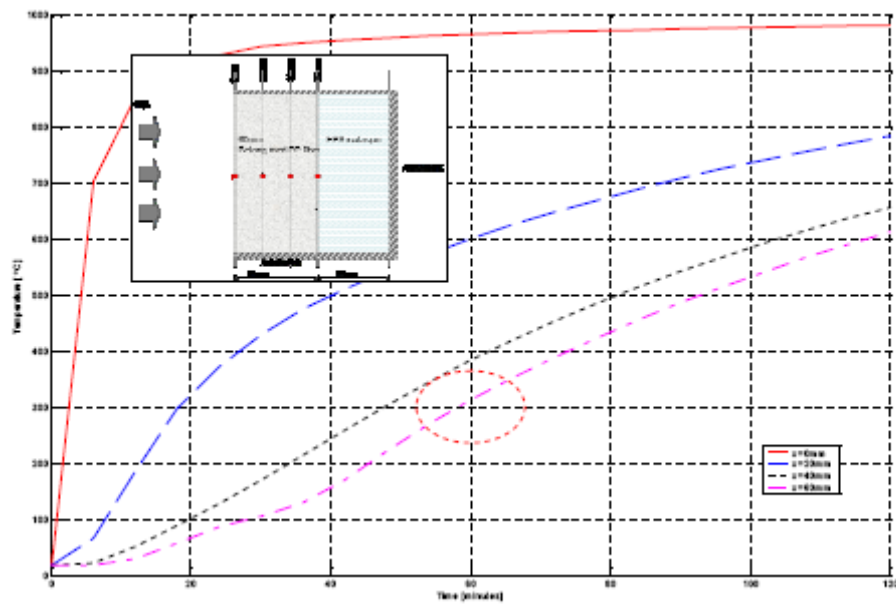
Beregningsresultatene viser at 60 mm sprøytebetong blir for tynt og at det er nødvendig med minimum 80 mm sprøytebetong av denne type for å gi tilfredsstillende beskyttelse for underliggende brennbar isolasjonsmateriale for denne brannen i en time. Akseptkravet er maksimum 250 °C i skillet mellom sprøytebetong og brennbar isolasjon etter 60 minutter.



Figur 25 Tykkelse på 100 mm og temperatur i skillet betong - isolasjon etter 100 minutter er ca. 150 °C



Figur 26 Tykkelse på 80 mm og temperatur i skillet betong - isolasjon etter 60 minutter er ca. 140 °C og godt innenfor akseptkravet på 250 °C



Figur 27 Tykkelse på 60 mm og temperatur i skillet betong - isolasjon etter 60 minutter er ca. 300 °C og overskrider akseptkravet på 250 °C

4 Konklusjon

Den oppsatte tunnelkledningen ble branntestet i virkelig utførelse for en dieselbrann med rask brannutvikling opp til 100 MW, deretter varierende mellom 80 – 100 MW i en time for deretter å falle gradvis tilbake til rundt 10 MW etter 3,5 time. Denne branneffekten holdt seg konstant i ytterligere 2 timer. Vekstraten for temperatur i 60 minutter (både for stigning og maksimalverdi) i denne testen kan sammenlignes med de høyeste brannkurvene for tid-temperatur.

Prøvekonstruksjonen var intakt under hele forsøket og kun mindre smelteskader i isolasjonen (PE-platene) ble observert under etterkontroll. Det var ikke antydning til antennelse av isolasjonen bak sprøytebetonghvelvet. Mange småsprekker i sprøytebetongoverflaten og litt avskalling i et begrenset område ble observert. Sprøytebetonghvelvet hadde varierende tykkelse (fra 80 mm til 150 mm), noe som er over det som er gjeldende krav. Etterberegninger har vist at 80 mm sprøytebetongtykkelse er minimum for tilstrekkelig å kunne beskytte underliggende brennbar isolasjon i henhold til akseptkravet.

5 Vedlegg



Figur 28 Sprøytebetongkonstruksjonen før varmeeeksponering



Figur 29 Dieselpøl på 40 m³ med plass til 11 000 l diesel tilsvarende en tankbil



Figur 30 Brannutviklingen umiddelbart etter antennelse



Figur 31 Brannrøyken brer seg mot ventilasjonsretningen (60 sekunder etter antennelse)



Figur 32 Konsekvens av redusert ventilasjon, medførte kald røyk ved utløpet



Figur 34 Etter testen, lite nedfall i selve prøvefeltet



Statens vegvesen

Statens vegvesen Vegdirektoratet
Postboks 8142 Dep
N - 0033 Oslo

Tlf. (+47 915) 02030
E-post: publvd@vegvesen.no

ISSN 1504-5005